



طراحی و ساخت آشکارساز نیم‌رسانای CdZnTe برای آشکارسازی پرتو گاما

نوید بالکانیان، میکائیل یگانه*، شهریار رحمت‌اله‌پور، مهدی تقوی، ابوالفضل ثوری
مجتمع پژوهشی شمال غرب، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، بناب - ایران

چکیده: در این مقاله، مرحله‌های انتخاب بلور، آماده‌سازی نمونه‌ها و نحوه‌ی ایجاد اتصال‌های شوتکی و اهمی برای ساخت آشکارساز CdZnTe یا CZT قابل حمل و با قابلیت کار در دمای اتاق ارایه شده است. ابتدا درصد عناصر و اندازه‌های بلور CdZnTe با کد MCNP4C تعیین و تأثیر آن‌ها بر رفتار الکتریکی و آشکارسازی قطعه بررسی شد. پس از تهیه بلور، سطح بلور به روش شیمیایی آماده و فعال‌سازی شد. در طرف صاف‌تر سطح بلور، فلز طلا با خلوص بالا به ضخامت ۱۰۰ نانومتر به عنوان اتصال شوتکی و بر روی طرف دیگر، فلز ایندیم به عنوان اتصال اهمی با روش تبخیر فیزیکی، لایه نشانی شد. مشخصات الکتریکی حسگر ساخته شده با استفاده از تجهیزهای دقیقی اندازه‌گیری جریان-ولتاژ، جریان-ظرفیت و جریان-دما اندازه‌گیری و مشخصه‌های فیزیکی قطعه تعیین شد. در نهایت حسگر به پیش‌تقویت‌کننده، شکل‌دهنده‌ی نبض، تقویت‌کننده و تحلیل‌گر بس‌کاناله متصل شد. آشکارساز ساخته شده توسط چشمه‌های نقطه‌ای ^{137}Cs ، ^{232}Th آزموده شده و با نمونه‌هایی از اورانیم مقیاس‌بندی شد. نتیجه‌ها نشان داد که پهنای نیم-ارتفاع برای قله‌ی ۶۶۲ keV، برابر با ۳٫۸٪ و خطای اندازه‌گیری برای نمونه‌های مجهول اورانیم کم‌تر از ۳٪ است.

کلیدواژه‌ها: بلور CZT، اتصال شوتکی، اتصال اهمی

Design and manufacture of CdZnTe semiconductor detector for gamma ray detection

N. Balkanian, M. Yeganeh*, Sh. Rahmatallahpur, M. Taghavi, A. Souri
Worth North Research Complex, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14395-836, Bonab - Iran

Abstract: In this paper, the process of crystal selection, samples preparation and method of schottkey and ohmic contacts creation for CdZnTe or CZT detector, to be used as a portable device operating at room temperature, have been reported. First, the ratio of CZT element and crystal dimensions was determined via MCNP4C code and its effect on the electrical and detection behavior was investigated. After the crystal preparation, its surface was activated by chemical method. On one side, Au with a thickness of 100nm was coated as a schottkey contact and on the other side, in was coated as an ohmic contact with physical vapor deposition. The electrical characters of the sensor such as current-voltage, current-capacitance and current-temperature were measured. The sensor was connected to a pre-amp, pulse shaping, amplifier and MCA. The detector was tested by point sources of Cs-137 and Th-232, and was calibrated by standard uranium samples. The results showed that the FWHM of 662 keV is 3.8 keV and the error for the enrichment determination was less than 3%.

Keywords: CZT crystal, Schottkey contact, Ohmic contact

*email: myeganeh@bnrc.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۴/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۳/۳

**۱. مقدمه**

مرجع‌های [۱۳] و [۱۴، ۱۵] گزارش شده است. پس از تهیه‌ی بلور، برای ساخت حسگر، سطح بلور به روش شیمیایی آماده و فعال‌سازی شد. در طرف صاف‌تر سطح بلور، فلز طلا با خلوص بالا و به ضخامت ۱۰۰ نانومتر به عنوان اتصال شوتکی و بر روی طرف دیگر بلور، فلز ایندیم به عنوان اتصال اهمی به روش لایه‌نشانی بخار فیزیکی^(۱) (PVD) نشانده شد. مشخصه‌های الکتریکی حسگر ساخته شده با استفاده از تجهیزهای دقیق اندازه‌گیری جریان-ولتاژ، جریان-ظرفیت و جریان-دما اندازه‌گیری و مشخصه‌های فیزیکی قطعه تعیین شد. در نهایت حسگر به پیش تقویت‌کننده، شکل‌دهنده‌ی تپ، تقویت‌کننده و تحلیل‌گر بس کاناله متصل شد. آشکارساز ساخته شده، با استفاده از چشمه‌های نقطه‌ای ^{137}Cs ، ^{232}Th آزموده شده و با نمونه‌های استاندارد اورانیم مقیاس‌بندی شد.

۲. روش کار**۱.۲. تهیه‌ی بلور**

اندازه‌ی بلور یکی از پارامترهای مهم در بحث آشکارسازی است. انتخاب بلور با ضخامت بیش‌تر باعث بازترکیب الکترون‌های تشکیل شده می‌شود و در نتیجه از تعداد الکترون‌های تشکیل‌دهنده‌ی جریان کاسته می‌شود. انتخاب بلور با ضخامت کم نیز باعث عبور مقدار قابل توجهی از پرتو گاما از بلور و عدم آشکارسازی کل پرتو خواهد شد. از این‌رو، تعیین اندازه‌ی بلور علاوه بر این که از یک محدودیت فنی برخوردار است در قیمت تمام شده و نیز توان مصرفی دستگاه تأثیر دارد. بنابراین برای تهیه‌ی بلورهای CdZnTe ابتدا، اندازه‌ی بهینه‌ی بلور با استفاده از کد MCNP محاسبه شد. درصد عناصر تشکیل‌دهنده‌ی بلور نیز از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، چون با تغییر درصد گاف انرژی بلور، قابلیت حرکت الکترون‌ها و نیز عدد اتمی آن تغییر می‌کند. تغییر هر کدام از این پارامترها تأثیر زیادی بر روی رفتار الکتریکی و آشکارسازی قطعه خواهد داشت. به دلیل تأثیر فوق‌العاده‌ی این پارامترها و اطمینان از صحت داده‌ها و نیز استخراج داده‌هایی که به عنوان مشخصه‌های فنی معمول ذکر نمی‌شوند ولی در این کار مورد نیاز بود ما مجبور به انجام تجزیه و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای بوده‌ایم. اندازه‌ی بلور و درصد عناصر طوری تعیین شد که هم دارای جریان بیشینه و هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد [۱۳]. شکل ۱ خروجی کد

با استفاده از پرتو گامای گسیلیده از ماده‌ی پرتوزای گاما-گسیل می‌توان نوع ماده را تعیین نمود. طیف‌سنجی گاما یک روش غیرمخرب برای اندازه‌گیری غنای اورانیم محسوب می‌شود [۱]. به دلیل قابلیت حرکت مناسب الکترون‌ها، عدد اتمی بالا و نیز قابلیت تغییر گاف انرژی با تغییر درصد عنصر روی (Zn) و حجم کم، نیم‌رسانای $\text{Cd}_x\text{Zn}_{(1-x)}\text{Te}$ یکی از انتخاب‌های مهم برای آشکارسازی پرتوهای گاما در دمای اتاق به شمار می‌رود [۲]. یکی از کاربردهای مهم این نیم‌رسانا در اندازه‌گیری درصد غنای اورانیم است [۳]. امکان استفاده از این نیم‌رسانا در موردهایی هم چون تصویربرداری باپرتو ایکس، صنعت هسته‌ای و هم چنین پزشکی هسته‌ای وجود دارد. مزیت‌هایی مانند توانایی کار در دمای اتاق، گاف انرژی بزرگ (بیش از ۱٫۵ eV) برای کنترل تولید حرارتی حامل‌های ذاتی، توان توقف بالا و اندازه‌ی کوچک موجب شده در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری برای ساخت بدون عیب و نقص این نیم‌رسانا انجام شود. بلورهای CdZnTe به طور معمول از روش بریجمن تولید می‌شوند [۴-۸]. حسگر CdZnTe با استفاده از لایه‌نشانی فلزهای مختلف چون طلا و پلاتین بر سطح حسگر به عنوان الکترودهای آند و کاتد و با هندسه‌های گوناگون ساخته می‌شود. این الکترودها متناسب با حجم آشکارساز با ولتاژهای مختلف تغذیه می‌شوند [۹، ۱۰]. وقتی پرتوهای یوننده با بلور CdZnTe برخورد می‌کنند، الکترون-حفره‌های تولید شده، به وسیله قطب‌های مخالف میدان الکتریکی اعمال شده جذب می‌شوند. بارهای جمع شده، به وسیله‌ی پیش تقویت‌کننده به تپ ولتاژ تبدیل و سپس به وسیله‌ی تقویت‌کننده تقویت می‌شود [۱۰، ۱۱]. علامت دریافتی از پیش تقویت‌کننده ابتدا به مدار شکل‌دهنده داده شده و پس از تبدیل شدن به تپ گاوسی شکل به تقویت‌کننده وارد می‌شود. علامت به دست آمده پس از نمونه‌برداری، به یک شمارگر استاندارد برای شمارش یا به یک تحلیل‌گر بس کاناله (MCA) برای تولید طیفی که مشخصه‌های فوتون‌های فرودی را مشخص می‌کند، ارسال می‌شود [۱۲].

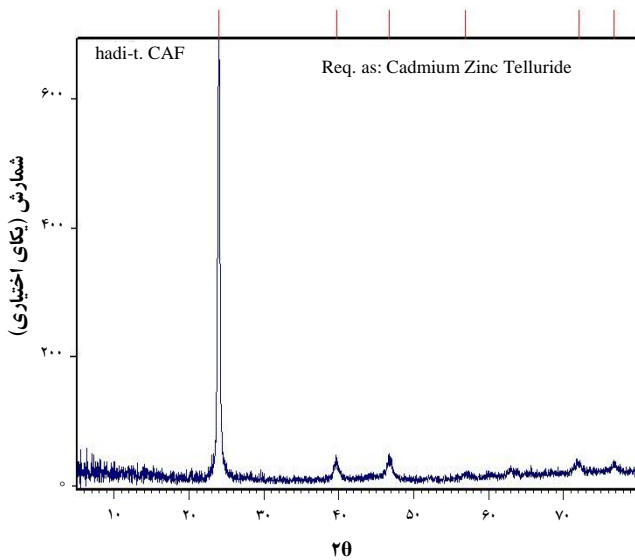
در این پژوهش، ابتدا با استفاده از کد MCNP۴C، اندازه‌های بهینه و درصد عناصر بلور CdZnTe و تأثیر هر کدام بر رفتار الکتریکی و آشکارسازی قطعه بررسی و اندازه‌ها و ترکیب مناسب برای این کار تعیین شد. جزئیات این بررسی‌ها در



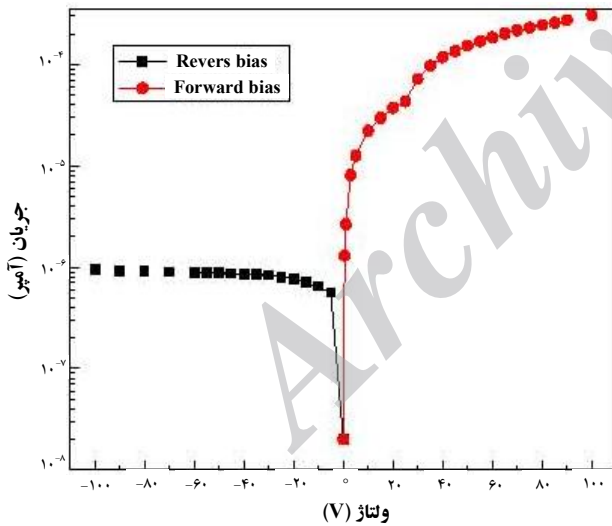
جدول ۱. میانگین درصد اتمی عناصر موجود در نمونه

روشن	گسیل پرتو ایکس	طیف سنجی پرتو ایکس	میانگین
عنصر	ذره-القایی	پاشندهی انرژی	
روی (Zn)	۱,۲۲۶	۰,۸۴	۱,۰۳۳
کادمیم (Cd)	۴۶,۹۵	۴۸,۶۱	۴۷,۷۵
تلوریم (Te)	۵۱,۷۰	۵۰,۵۵	۵۱,۱۲۵
Te/Cd	۱,۱	۱,۰۴	۱,۰۷

MCNPF۴C برای محاسبه‌ی سطح بلور و درصد عنصر Zn را نشان می‌دهد. در این کار نمونه‌هایی از بلور CZT ساخت شرکت ای‌وی پروداکت^(۲) در اندازه‌های $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 5\text{mm}$ مورد استفاده قرار گرفت. چون مقدار دقیق هر کدام از عناصر پیش گفته، نقش تعیین کننده‌ای در رفتار الکتریکی و آشکارسازی این نیم‌رسانا دارد، بعد از تهیه‌ی بلور درصد این عناصر به دقت اندازه‌گیری شد. درصد اتمی عناصر تشکیل دهنده‌ی نمونه با استفاده از دو روش طیف‌سنجی پرتو ایکس پاشنده‌ی انرژی (EDAX) و گسیل پرتو ایکس ذره-القایی (PIXE) اندازه‌گیری (جدول ۱) و ساختار شبکه‌ای آن با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس تعیین شد (شکل ۲ الف). بررسی شکل ۲ الف نشان می‌دهد که راستای غالب بلوری نمونه ۱۱۱ است.

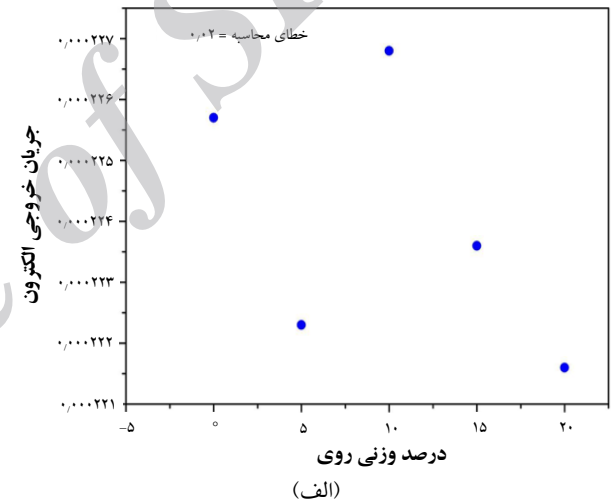


(الف)

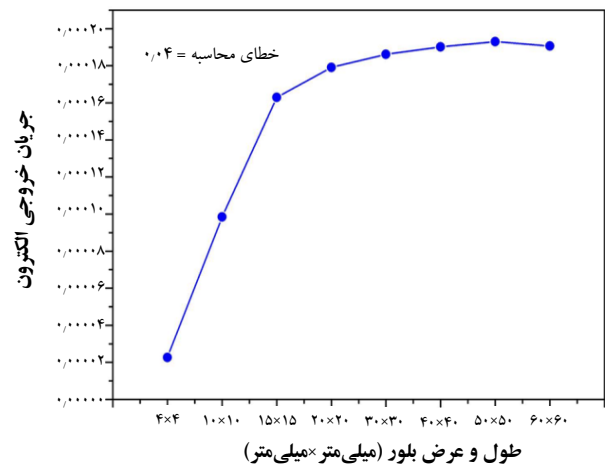


(ب)

شکل ۲. (الف) طیف پراش پرتو ایکس مربوط به بلور CZT که نشان می‌دهد راستای بلوری نمونه ۱۱۱ است؛ (ب) منحنی جریان-ولتاژ در پیش‌ولت مستقیم و وارون.

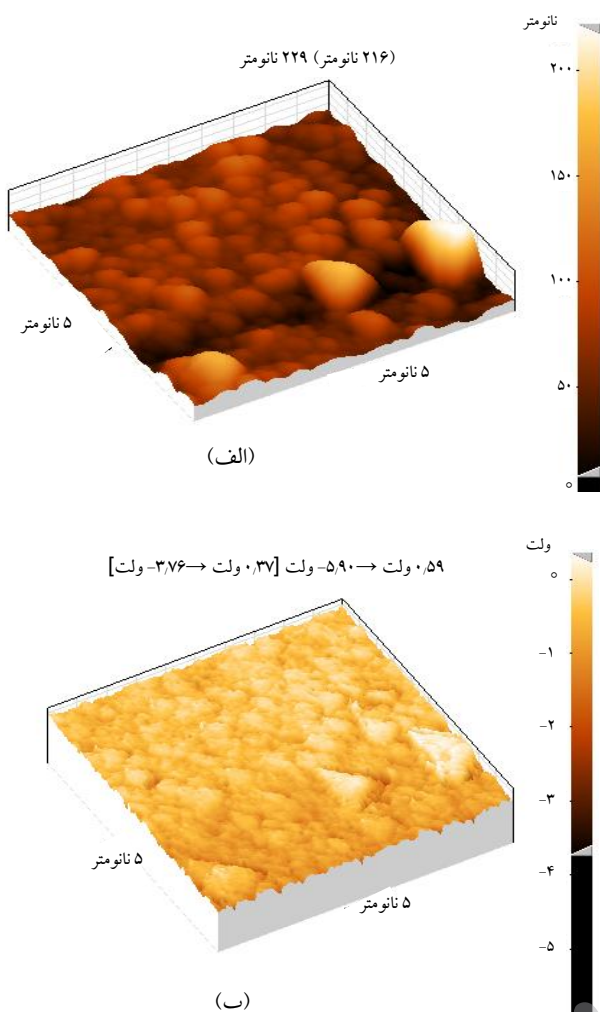


(الف)



(ب)

شکل ۱. (الف) جریان خروجی الکترون برحسب درصد وزنی Zn، (ب) جریان خروجی الکترون‌ها از سطح بلور $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ برحسب مساحت سطح برای یک بلور مکعبی.



شکل ۳. ریزنگارهای سطح بلور تمیز کاری شده، تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM): (الف) تصویر سطح نمونه‌ی نیم‌رسانا بعد از مرحله سونش و فعال‌سازی، (ب) ساختار فازی سطح نمونه.

۳.۲ اتصال‌های شوتکی و اهمی

برای ایجاد اتصال اهمی از فلز ایندیم خالص (۹۹٫۹۹۹٪) استفاده شد. برای این منظور با استفاده از دستگاه لایه‌نشانی بخار حرارتی ساخته شده به وسیله‌ی جهاد دانشگاهی دانشگاه شریف (EMS-۱۶۰)، تحت فشار 5×10^{-5} تور با دقت ۱ انگستروم، فلز ایندیم روی سطح نمونه نشانده شده و نهایتاً در دمای ۹۷۰ کلوین تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. عملیات حرارتی برای نفوذ ایندیم به داخل بلور و ایجاد اتصال اهمی در مدت بیست دقیقه تحت گاز آرگون انجام شد. برای ایجاد اتصال شوتکی نیز از روش تفنگ الکترونی (e-gun) دستگاه پیش‌گفته استفاده شد. با استفاده از این دستگاه، فلز طلا با خلوص (۹۹٫۹۹۹٪) و به ضخامت 1000 \AA بر روی سطح دیگر بلور نشانده شد. این کار

۲.۲ آماده‌سازی و فعال‌سازی شیمیایی سطح بلور

هدف از آماده‌سازی، در اولین مرحله زدودن هر نوع ماده‌ی خارجی مانند گرد و غبار، ریزذره‌های موجود بر روی سطح نمونه، چربی و لایه‌های اکسیدی است و در مرحله‌ی دوم، افزایش سطح تماس از طریق فعال‌سازی سطح برای افزایش چسبندگی در لایه‌نشانی است [۱۶]. برای این کار ابتدا محلول ۲٪ برم در حلال متانول (Br-MeOH) در زیر هود آزمایشگاه و با رعایت نکات ایمنی تهیه شد. نمونه‌ی بلور به مدت ۲ دقیقه در داخل محلول، تحت خوردگی قرار گرفت. در مرحله‌ی بعد به مدت ۴۰ دقیقه نمونه داخل محلول ۱۵٪ پتاسیم هیدروکسید قرار داده شد تا مواد چربی و آلاینده و اکسیدها به طور کامل زدوده شوند. برای اطمینان از تمیزکاری سطح از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) استفاده شد. سپس با آب دو بار یون‌زدایی شده شستشو داده شد. در مرحله‌ی دوم، محلول $(\text{NH}_4\text{F}-\text{H}_2\text{O}_2)$ (۱۰٪-۱۰٪) تهیه و نمونه به مدت ۴۵ دقیقه در داخل آن قرار داده شد. سپس با آب یون‌زدایی شده شستشو داده شده و در هوا خشک شد. در مرحله‌ی بعد فرایند فعال‌سازی برای افزایش سرعت لایه‌نشانی و ایجاد خلل و فرج بر روی سطح انجام شد. این کار عمدتاً از طریق غوطه‌ورسازی در محلول اسیدی صورت می‌گیرد. به این ترتیب که، نمونه‌ی بلور بعد از مرحله‌ی آماده‌سازی، به وسیله‌ی محلول محتوی ۸۰ گرم بر لیتر SnCl_2 و ۲۰۰ میلی‌لیتر بر لیتر HCl به مدت ۴۵ ثانیه در دمای اتاق حساس شده و سپس در محلول محتوی نمک PdCl_2 به غلظت ۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و HCl به غلظت ۹٫۵ میلی‌لیتر بر لیتر به مدت ۳۰ ثانیه در ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شد. در این حالت، نمونه، آمادگی لایه‌نشانی برای نیکل و ترکیب‌های آن را داشت [۱۷-۲۱]. شکل ۳ الف تصویر سطح نمونه‌ی نیم‌رسانا بعد از مرحله‌ی سونش و فعال شدن و شکل ۳ ب ساختار فازی سطح نمونه را که با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی گرفته شده است نشان می‌دهد. از شکل ۳ مشخص می‌شود که سطح نمونه پس از آماده‌سازی، به مقدار کافی از آلودگی‌ها پاک شده و در سطح نمونه عنصر خارجی مزاحم تقریباً وجود ندارد [۲۲].



در شکل ۱ الف جریان خروجی الکترون برای درصدهای وزنی مختلف روی (Zn) نشان داده شده است. جریان خروجی الکترون در درصدهای وزنی ۰ و ۱۰ روی (Zn) بیشینه بوده و آن سوتر با افزایش درصد Zn، کاهش می‌یابد. درصد وزنی بهینه‌ی Zn در CdZn، ۱۰ به دست آمد که دارای توافق خوبی با درصد وزنی معمول در بلورهای به کار رفته برای آشکارسازهای CZT است. در شکل ۱ ب مشاهده می‌شود که مقدار جریان خروجی الکترون‌ها با افزایش سطح بلور افزایش می‌یابد تا این که در بلوری به اندازه‌ی ۱۵mm×۱۵mm به بیشینه مقدار خود رسیده و از آن پس با افزایش سطح بلور تقریباً ثابت می‌ماند؛ افزایش سطح تنها باعث افزایش هزینه‌ی اقتصادی تولید آن خواهد شد [۲۴].

بستگی شدت جریان به ارتفاع مؤثر سد پتانسیل در اتصال‌های فلز-نیم‌رسانا (شوتکی)، خصوصیت عبور جریان در اتصال فلز-نیم‌رسانا را تغییر می‌دهد. بدین ترتیب چگالی جریان عبوری در اتصال فلز-نیم‌رسانای یکسوکننده چنین محاسبه می‌شود [۲۵]

$$J = A^* T^r \exp\left(-\frac{\Phi_B - \Delta\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$= J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_s = A^* T^r \exp\left(-\frac{\Phi_B - \Delta\Phi_B}{kT}\right) \quad (1)$$

که در آن، A^* ثابت ریچاردسون، T دما برحسب کلوین، Φ_B ارتفاع سد پتانسیل، $\Delta\Phi_B$ کاهش ارتفاع سد پتانسیل ناشی از انعکاس آینه‌ای، k ثابت بولتزمن، q بار الکترون، V ولتاژ خارجی اعمال شده و J_s جریان برگشتی (اشباع معکوس) است. با شرط $kT \gg V$ ، چگالی جریان در اتصال‌های شوتکی چنین تعیین می‌شود

$$J = A^* T^r \exp\left(-\frac{\Phi_B - \Delta\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$\approx A^* T^r \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \exp\frac{qV}{nkT} \quad (2)$$

با نرخ انباشت ۱/۵ آنگستروم در ثانیه و در فشار 5×10^{-5} تور و در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به انجام رسید.

۴.۲ مشخصه‌های سامانه‌های الکترونیکی آشکارساز

اولین قطعه‌ی الکترونیکی در تماس با حسگر، پیش تقویت کننده است. به همین خاطر پیش تقویت کننده باید تطبیق امپدانس با مقاومت خروجی حسگر را داشته باشد. برای این کار محل قرارگیری پیش تقویت کننده نزدیک‌ترین محل به حسگر انتخاب شد. علاوه بر آن برای جلوگیری از تأثیر نوفه بر مدارهای الکترونیکی، یک حفاظ مغناطیسی از آلومینیم ۷۰۰۰ به ضخامت ۵ میلی‌متر در اطراف پیش تقویت کننده تعبیه شد. خروجی پیش تقویت کننده برای انتقال حداکثر توان به مدار بعدی ۵۰ اهم در نظر گرفته شد. این مدار دارای دو ورودی ولتاژ بالا (۳۰۰۰ ولت و ۱۵۰ ولت با قابلیت تغییر) بود. بهره‌ی خروجی پیش تقویت کننده بین ۱۱۰۰ تا ۱۴۰۰ میلی‌ولت بر پیکو کولن طراحی شد. ولتاژ خروجی پیش تقویت کننده بین ۳- و ۳+ ولت تغییر می‌کرد. شکل موج خروجی پیش تقویت کننده به صورت یک تپ میرا بود. خروجی پیش تقویت کننده، به وسیله‌ی یک مدار شکل‌دهنده به صورت موج تقریباً سینوسی شکل داده می‌شد. مقاومت ورودی این مدار، کوچک و ۵۰ اهم بود. خروجی پیش تقویت کننده به تقویت کننده‌ی اصلی فرستاده می‌شد. این مدار وظیفه‌ی تقویت دامنه‌ی علامت خروجی حسگر را دارا بود و چون خروجی این مدار به مبدل قیاسی به رقمی داده می‌شد، دامنه‌ی آن باید از اندازه‌ی موردنظر برخوردار می‌بود. این مدار باید تطبیق امپدانس با مقاومت خروجی مدار شکل‌دهنده‌ی تپ را داشته و دارای نوفه‌ی بسیار کم و بهره‌ی تقویت خوبی می‌بود. خروجی تقویت کننده، قیاسی بود. برای تبدیل علامت قیاسی گرفته شده از تقویت کننده و پردازش آن از تحلیل‌گر ۴۰۹۶ کاناله استفاده شد.

۳. یافته‌ها و بحث

ابتدا، درصد عناصر تشکیل‌دهنده و اندازه‌ی بلور CdZnTe موردنظر و تأثیر آن‌ها بر رفتار الکترونیکی و آشکارسازی قطعه، با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای بررسی و پارامترهای مناسب تعیین شد [۲۲، ۲۳].



بعد از ساخته شدن آشکارساز، سامانه با چشمه‌های سزیم و توریم شرکت مرک آزموده شده و با سوخت‌های رآکتور موجود در پژوهشکده‌ی رآکتور و با نمونه‌های استاندارد اورانیم با غنای کم‌تر از ۲۰٪ مطابق مرجع‌های ۲۷ و ۲۸ مقیاس‌بندی شد. شکل ۴ الف طیف سزیم-۱۳۷ در آشکار سوسوزن NaI، را نشان می‌دهد. در این طیف، قله‌ی نوری در انرژی ۶۶۲ keV دارای پهنای نیم-ارتفاع ۸٪ است. شکل ۴ ب طیف چشمه‌ی سزیم-۱۳۷ در آشکارساز CZT ساخته شده است که در آن قله‌ی سبزرنگ، قله‌ی نوری با انرژی ۶۶۲ keV و با پهنای نیم-ارتفاع ۳٫۸٪ است. در این طیف، لبه‌ی کامپتون با انرژی ۴۸۱ keV و قله‌ی پس‌پراکندگی در انرژی ۱۸۱ keV مشاهده می‌شوند. شکل ۴ ج طیف ^{137}Cs و ^{232}Th در آشکارساز CZT ساخته شده است. قله به رنگ سبز قله‌ی نوری سزیم-۱۳۷ در انرژی ۶۶۲ keV و قله به رنگ آبی قله‌ی نوری توریم-۲۳۲ در انرژی ۲۳۹ keV است. قله با شدت کم بوده و در انرژی ۵۸۳ keV مربوط به توریم-۲۳۲ در کنار قله‌ی نوری سزیم-۱۳۷ دیده می‌شود. قله‌ی ۳۳۸ keV توریم نیز در طیف کامپتون سزیم-۱۳۷ مشاهده می‌شود. قله‌ی قبل از قله‌ی نوری توریم، قله‌ی پس‌پراکندگی مربوط به سزیم-۱۳۷ است. قله‌ی قبل از قله‌ی پس‌پراکندگی پرتو ایکس k سرب-۲۰۸ در انرژی ۷۵ keV قرار دارد. شکل ۴ د طیف U_3O_8 با غنای کم‌تر از ۲۰٪ اورانیم-۲۳۵ در آشکارساز CZT ساخته شده، برای زمان شمارش ۳۰۰ ثانیه است. شکل ۴ ه شدت قله‌ی ۱۸۵٫۷ keV برای غناهای مختلف را مقایسه می‌کند. این شکل‌ها تطابق خوبی با مرجع [۲۷] دارند. معادله‌ی مقیاس‌بندی به دست آمده، این است [۲۸]

$$E = 0,0030903 C_1 - 0,001946 C_2 \quad (6)$$

که در آن، E غنای اورانیم-۲۳۵ برای نمونه‌ی مجهول، C_1 مساحت سطح زیر قله‌ی ۱۸۵٫۷ keV و C_2 مساحت سطح ناحیه‌ی نزدیک به C_1 است.

ارتفاع مؤثر سد پتانسیل Φ_{BF} اتصال فلز-نیم‌رسانای یکسوکننده با مساحت سطح اتصال S_F در دمای T چنین تعیین می‌شود

$$\Phi_{BF} = kT \ln \frac{S_F A T^2}{I_{OF}} \quad (3)$$

که در آن I_{OF} جریان اشباع در پیش‌ولت مستقیم بوده و از منحنی V-I قطعه‌ی ساخته شده تعیین می‌شود. منحنی V-I در مقیاس نیمه‌لگاریتمی، و با شرط $V > kT/q$ و در محدوده‌ی ولتاژ تغذیه‌ی $\frac{kT}{q} < V < \frac{\Phi_{BF}}{q}$ یک خط راست خواهد بود.

ضخامت لایه‌ی تهی در طرف نیم‌رسانا از معادله‌ی پواسون تعیین می‌شود. به هنگام تحلیل آن، مکان انرژی نوار ظرفیت و نوار رسانش نیم‌رسانا به عنوان شرط‌های مرزی در نظر گرفته می‌شود. اگر $x < d_0$ آن‌گاه $Q \approx qN_D$ و برای $x > d_0$ $dV/dx \approx 0$. ضخامت لایه‌ی تهی در اتصال شوتکی و در طرف نیم‌رسانا (d_0) همانند اتصال p-n چنین به دست می‌آید [۲۶]

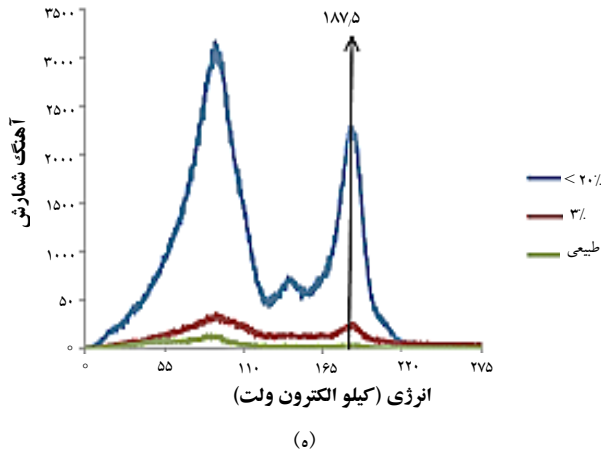
$$d_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_D - \frac{kT}{q})} \quad (4)$$

که در آن V_D ولتاژ نفوذ، ϵ_s نفوذپذیری دی‌الکتریک نیم‌رسانا است. ظرفیت C در واحد سطح لایه‌ی تهی چنین به دست می‌آید

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_D - \frac{kT}{q})}{q\epsilon_s N_D} \quad (5)$$

بر این اساس، عمق ناحیه‌ی تهی بستگی به ولتاژ اعمال شده دارد. در نیم‌رسانای CZT برای ایجاد هر یک میلی‌متر از ناحیه‌ی تهی حدود ۲۰۰ ولت مورد نیاز است.

قبل از وصل کردن حسگر به قطعه‌های الکترونیکی باید مطمئن شد که قطعه خاصیت دیودی دارد. شکل ۲ ب، منحنی جریان-ولتاژ حسگر برای پیش‌ولت مستقیم و معکوس را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از شکل ۲ ب مشاهده می‌شود قطعه‌ی درست شده یک رفتار کاملاً شوتکی از خود نشان می‌دهد، به طوری که در پیش‌ولت وارون به اشباع رسیده و در پیش‌ولت مستقیم، جریان زیادی از قطعه عبور می‌کند. هر چه جریان اشباع معکوس کوچک‌تر باشد فوتون‌هایی با انرژی کم‌تر آشکار می‌شود.



(ه)

شکل ۴. الف) طیف سزیم-۱۳۷ در آشکارساز NaI، ب) طیف سزیم-۱۳۷ در آشکارساز CZT ساخته شده، ج) طیف توریم-۲۳۲ و سزیم-۱۳۷ در آشکارساز CZT ساخته شده، د) طیف U_2O_8 با غنای کم تر از ۲۰٪، ه) مقایسه‌ی شدت قله‌ی ۱۸۵٫۷ کیلو الکترون ولت برای غناهای مختلف اورانیم-۲۳۵.

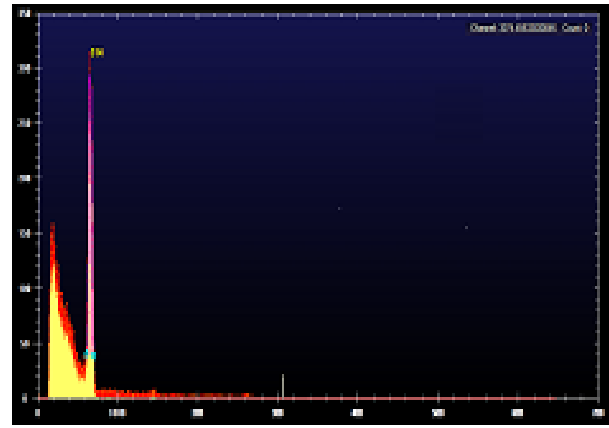
برای اطمینان از معادله‌ی ۶، نمونه‌ی استاندارد U_2O_8 برای زمان ۲۲۹ ثانیه به وسیله‌ی آشکارساز شمارش شد. این شمارش مقادیر زیر را به دست داد:

$$C_1 = 6495 \quad \text{و} \quad C_2 = 382$$

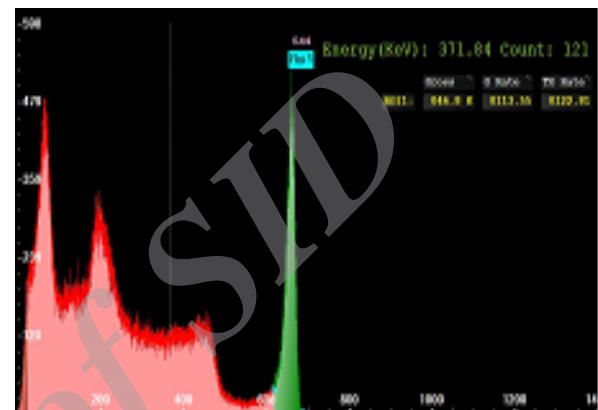
غنای محاسبه شده با استفاده از این مقادیر C_1 و C_2 و براساس معادله‌ی ۶ دارای خطای کم تر از ۳٪ با غنای واقعی بود.

۴. نتیجه گیری

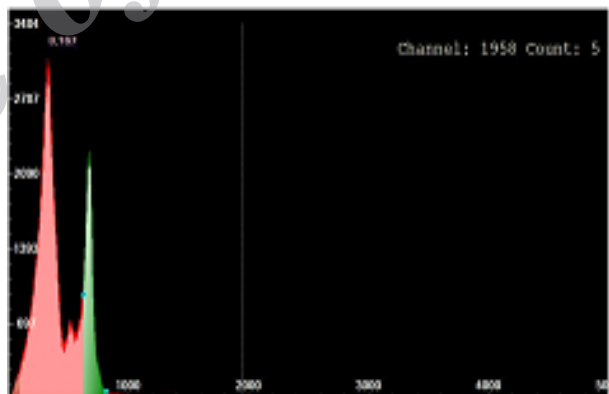
در این کار، برای انتخاب بلور مناسب ابتدا درصد عناصر تشکیل دهنده و اندازه‌ی بلور CZT مورد نظر و تأثیر آن‌ها بر رفتار الکتریکی و آشکارسازی قطعه، با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای بررسی و پارامترهای مناسب تعیین شدند. پس از تهیه‌ی بلور، برای ساخت حسگر، سطح بلور به روش شیمیایی آماده و فعال‌سازی شد. در طرف صاف تر سطح بلور، فلز طلا با خلوص بالا به ضخامت ۱۰۰ نانومتر به عنوان اتصال شوتکی و بر روی طرف دیگر بلور، فلز ایندیم به عنوان اتصال اهمی به روش لایه‌نشانی بخار فیزیکی نشانده شد. مشخصه‌های الکتریکی حسگر ساخته با استفاده از تجهیزات دقیق اندازه‌گیری جریان-ولتاژ، جریان- ظرفیت و جریان- دما اندازه‌گیری، و مشخصه‌های



(ف)

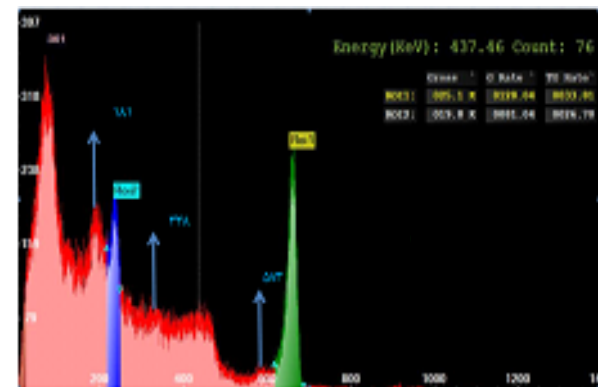


(ب)



شماره کانال

(ج)



انرژی (کیلو الکترون ولت)

(د)



مرجع‌ها

[1] R. Arlt, V. Ivanov, K. Parnham, Advantages and Use of CdZnTe Detectors in Safeguards Measurements, International Atomic Energy Agency, Department of Safeguards, Wagramer Strasse 5.

[2] T.E. Schlesinger, J.E. Toney, H. Yoon, E.Y. Leed, B.A. Brunett, L. Franks, R.B. James, Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material, Materials Science and Engineering, 32 (2001) 103-189.

[3] R. Carchon, M. Moeslinger, L. Bourva, C. Bass, M. Zende, Gamma radiation detectors for safeguards applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A., 579 (2007) 380-383.

[4] A.A. Melnikov, A.S. Sigov, K.A. Vorotilov, A.A. Davydov, L.A. Topolova, N.V. Zhavronkov, Growth of CdZnTe single crystals for radiation detectors, J. Crystal Growth, 197 (1999) 666.

[5] Sh. Zhu, B. Zhao, Q.F. Yu, Sh. Shao, X. Zhu, Modified growth of CdZnTe single crystals, J. Crystal Growth, 208 (2000) 264.

[6] Y. Eisen, A. Shor, CdTe and CdZnTe materials for room-temperature X-ray and gamma ray detectors, J. Crystal Growth, 184/185 (1998) 01302.

[7] N.N. Kolesnikov, A.A. Kolchin, D.L. Alov, Yu.N. Ivanov, A.A. Chernov, M. Schieber, H. Hermon, R.B. James, M.S. Goorsky, H. Yoon, J. Toney, B. Brunett, T.E. Schlesinger, Growth and characterization of p-type $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x=0.1, 0.2, 0.3$), J. Crystal Growth, 174 (1997) 256.

[8] J.J. Perez Buenno, M.E. Rodriguez, O. Zelaya-Angel, R. Baquero, J. Gonzalez-Hernandez, B.J. Banos, L. Fitzpatrick, Growth and characterization of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ crystals with high Zn concentration, J. Crystal Growth, 209 (2000) 701.

[9] Zh. Gangqiang, W. Jie, D. Zeng, Y. Xu, W. Zhang, F. Xu, The study on Schottky contact between Au and clean CdZnTe, Surface Science, 600 (2006) 2629-2632.

فیزیکی قطعه تعیین شد. در نهایت حسگر به پیش تقویت کننده، شکل دهنده‌ی تپ، تقویت کننده و تحلیل گرس کاناله متصل شد. آشکارساز ساخته شده، به وسیله‌ی چشمه‌های نقطه‌ای ^{137}Cs ، ^{232}Th سنجیده شدند. طیف‌های به دست آمده با این آشکارساز تطابق قابل قبولی با کارهای مشابه داشته و نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که پهنای نیم-ارتفاع برای قله‌ی $662 keV$ ، 3.8% است. قدرت تفکیک آشکارسازهای CZT شرکت رایتک^(۳) زیر 4.5% است. هم‌چنین این آشکارساز با نمونه‌های استاندارد اورانیم مقیاس‌بندی شده و غنای اورانیم برای نمونه‌های مجهول تعیین شد. اندازه‌گیری‌ها و محاسبه‌ها نشان دادند که، درصد خطا برای تعیین غنای اورانیم کم‌تر از 3% است.

پی‌نوشت‌ها

1. Physical Vapor Deposition
2. eV product
3. Ritec

Archive of SID



- [10] E. Aleksey, E. Bolotnikov, S. Boggs, C.M. Hubert Chen, R. Walter, C. Fiona, A. Harrison, S.M. Schindler, Properties of PtSchottky type contacts on high-resistivity CdZnTe detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.*, 482 (2002) 395–407.
- [11] KiHyun Kim, ShinHang Cho, Jong Hee Suh, Jae Ho Won, Jin Ki Hong, Sun Ung Kim, Schottky-type polycrystalline CdZnTe X-ray detectors, *Current Applied Physics*, 9 (2009) 306–310.
- [12] S.V. Vadawale, S. Purohit, M. Shanmugam, Y.B. Acharya, J.N. Goswami, M. Sudhakar, P. Sreekumar, Characterization and selection of CZT detector modules for HEX experiment onboard Chandrayaan-1, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.*, 598 (2009) 485-495.
- [13] N. Balkanian, A. Ghaneh, M.A. Yeganeh, Investigation of the dimension, linear attenuation coefficient and weight percent of the $Cd_{1-x}Zn_xTe$ crystal in the CZT detectors with of the MCNP code, 17th Iranian Nuclear Conference, Esfahan (1388).
- [14] M.A. Yeganeh, Sh. Ramatollahpour, Nuclear test of CdZnTe crystal with Ni schottky and In ohmic contacts, 18th Iranian nuclear conference, Yazd (1390).
- [15] M.A. Yeganeh, Sh. Ramatollahpour, Investigation of the Pt/n-CdZnTe contacts electrical characteristics with series resistance as X and Gamma ray detectors, Iranian Physics Conference, Hamadan (1389).
- [16] Q. Zheng, F. Dierre, J. Crocco, V. Carcelen, H. Bensalah, J.L. Plaza, E. Dieguez, Influence of surface preparation on CdZnTe nuclear radiation detectors, *Applied Surface Sci.*, 257 (2011) 8742-8746.
- [17] Gangqiang Zha, Wanqi Jie, Tingting Tan, Peisen Li, The surface leakage currents of CdZnTe wafers *Applied Surface science*, 253 (2007) 3476-3479.
- [18] M.J. Mescher, T.E. Schlesinger, J.E. Toney, B.A. Brunett, Development of Dry Processing Techniques for CdZnTe Surface Passivation, *Journal of Electronic Materials*, 28 (6) (1999) 700-704.
- [19] Biswajit. Ghosh, Electrical contacts for II–VI semiconducting devices, *Microelectronic Engineering*, 86 (2009) 2187-2206.
- [20] M.E. Özsan, P.J. Sellin, P. Veeramani, S.J. Hinder, M.L.T. Monnier, G. Prekas, A. Lohstroh, M.A. Baker, Chemical etching and surface oxidation studies of cadmium zinc telluride radiation detectors, *Surface and Interface Analysis*, 42 (2000) 795-798.
- [21] A.J. Nelson, A.M. Conway, C.E. Reinhardt, J.L. Ferreira, R.J. Nikolic, S.A. Payne, X-ray photoemission analysis of passivated $Cd_{(1-x)}Zn_xTe$ surfaces for improved radiation detectors, *Materials Letters*, 63 (2011) 180-181.
- [22] T.H. Prettyman, M.A. Hoffbauer, J.A. Rennie, Performance of CdZnTe detectors passivated with energetic oxygen atoms, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.*, 422 (1999) 179-184.
- [23] H. Hermon, M. Schieber, R.B. James, J. Lund, A.J. Antolak, D.H. Morse, N.N.P. Kolesnikov, Y.N. Ivanov, M.S. Goorskyd, H. Yoond, J. Toneye, T.E. Schlesinger, Homogeneity of CdZnTe detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.*, 410 (1998) 100-106.
- [24] M. Schieber, T.E. Schlesinger, R.B. James, H. Hermon, H. Yoon, M. Goorski, Study of impurity segregation, crystallinity and detector performance of melt-grown cadmium zinc telluride crystals, *J. Crystal Growth*, 237 (2002) 2082.
- [25] R.K. Mamedov a, M.A. Yeganeh, Current transport and formation of energy structures in narrow Au/n-GaAs Schottky diodes, *Microelectronics Reliability*, 52 (2012) 418–424.
- [26] Simon M. Sze, K. Kwok, Ng Physics of Semiconductor Devices 3rd Edition, Jonh wiley (2007).
- [27] H.A. Smith, The Measurement of Uranium Enrichment, Los Alamos National Laboratory (1990).
- [28] P. Mortreau, R. Berndt, Handbook of Gamma Spectrometry Methods for Non-destructive Assay of Nuclear Materials, (2006).